

2. **Зеньковский, А.Г.** Интенсификация теплообмена – один из путей экономии топлива в нагревательных печах / А.Г. Зеньковский. – М.: ВНИИгазпром, 1985.

3. **Тимошпольский, В.И.** Концепция реконструкции и модернизации парка нагревательных печей металлургических и машиностроительных предприятий Республики Беларусь: от теории к практике / В.И. Тимошпольский [и др.] // Литье и металлургия. – № 2. – 2007. – С. 21–28.

УДК 621.791.927

К.Е. БЕЛЯВИН, д-р техн. наук (БНТУ),
А.В. СОСНОВСКИЙ (ОИМ НАНБ),
И.В. БАБУШКИН, канд. техн. наук (ИФ НАНБ)

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ФРОНТА ПЛАВЛЕНИЯ ПРИ РАСПЛАВЛЕНИИ ПОРОШКОВОЙ ШИХТЫ ЗАГОТОВКОЙ РАЗОГРЕВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫМ СПОСОБОМ

Одним из перспективных методов повышения срока службы деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, является метод наплавки износостойких покрытий, предложенный в ОИМ НАН Беларуси [1]. Суть его состоит в том, что порошковый материал оплавляется на поверхности разогретой заготовки, погруженной в емкость с этим порошком. При этом нагрев заготовки осуществляют электроконтактным способом. После кратковременной выдержки деталь извлекается с образовавшимся на ее поверхности слоем присадочного материала заданной толщины. На основе данного метода была разработана технология наплавки, позволяющая получать покрытия заданной толщины на различных деталях стержневого типа. Для реализации технологии можно использовать стандартные электроконтактные установки для точечной, шовной или рельефной сварки, обеспечивающие высокий КПД при быстром разогреве наплавляемой детали.

Основной сложностью в процессе наплавки методом электроконтактного оплавления является выбор технологических режимов,

особенно определение времени пропускания электрического тока через наплавляемую заготовку, необходимого для получения покрытия заданной толщины. В связи с этим возникает необходимость разработки математической модели процесса наплавки, основанной на анализе тепловыделения и теплообмена в системе «заготовка – порошковый материал». В работе [2] была предложена математическая модель, которая рассматривает движение фронта плавления в порошковом материале при условии, что температура наплавляемой детали постоянна и равна температуре плавления порошковой шихты. Однако не все электроконтактные установки могут поддерживать температуру разогреваемой детали постоянной. В связи с этим необходимо разработать математическую модель, рассматривающую движение фронта плавления при оплавлении порошкового материала заготовкой, разогреваемой электроконтактным способом при условии, что деталь постоянно нагревается.

Для выбора подхода к разработке математической модели оплавления порошковых слоев за счет теплообмена с деталью, нагреваемой электрическим током, рассмотрим систему, состоящую из монолитного металлического стержня, на внешней поверхности которого сформирован слой металлического порошка.

Тепловыделение при электроконтактном нагреве представляет собой сложный процесс, поэтому примем следующие допущения:

1. Стержень, на который происходит наплавка покрытия, является бесконечно длинным.
2. Тепловыделение в теле стержня происходит равномерно по всей его длине.

В настоящей работе решение поставленной задачи решается в два этапа: нагрев порошка и его плавление.

Расчет первого этапа приведен в работе [2]. На втором этапе будем рассматривать движение «фронта плавления» в зависимости от времени (задача Стефана).

В связи с этим будем считать, что закон движения фронта плавления определяется по формуле:

$$y = k\beta\sqrt{t} . \quad (1)$$

Геометрия задачи для второго этапа представлена на рисунке 1. В данном случае, в отличие от первого этапа, будем иметь не две, а три области, одна из которых представляет собой жидкую фазу.

Обозначим $\Theta = T - T_0$ как относительную температуру. Тогда Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 – температуры разных частей системы (рисунок 1).

Система уравнений для всей системы будет иметь вид:

$$\frac{\partial \Theta_i}{\partial t} = a_i \left(\frac{\partial^2 \Theta_i}{\partial r^2} + \frac{1}{2} \frac{\partial \Theta_i}{\partial r} \right) + \frac{q_{v_i}}{c_{\gamma_i}}; \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где q_v – объемная плотность внутренних источников теплоты; c_{γ_i} – удельная теплоемкость материала стержня, Дж/(кг·К); a – температуропроводность среды, м²/с; t – время нагрева, с; r – текущий радиус нагреваемой среды, м.

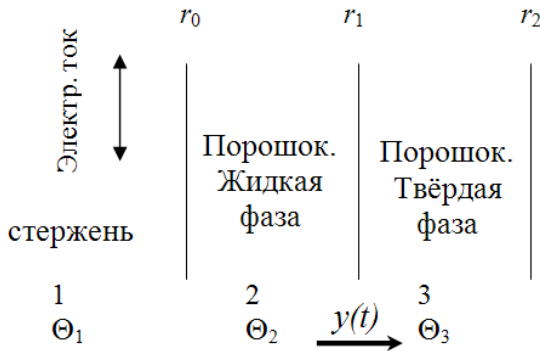


Рисунок 1 – Схема для расчета движения фронта плавления порошковой шихты при ее теплообмене с заготовкой, разогреваемой электроконтактным способом

Запишем граничные условия для задачи (2).

На границе между стержнем и расплавленной фазой – условие сопряжения (4-го рода):

$$\Theta_1 \Big|_{r=r_0} = \Theta_2 \Big|_{r=r_0}; \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial r} \Big|_{r=r_0}, \quad (4)$$

где λ_1, λ_2 – теплопроводность стержня и жидкой фазы порошка соответственно, Вт/(м·К);

На границе между жидкой и твердой фазой порошка:

$$\Theta_2 \Big|_{r=y(t)} = \Theta_{i\ddot{e}}; \quad (5)$$

$$\Theta_3 \Big|_{r=y(t)} = \Theta_{i\ddot{e}}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Theta_2}{\partial r} \Big|_{r=y(t)} = \xi_2 \frac{\partial y}{\partial t}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Theta_3}{\partial r} \Big|_{r=y(t)} = \xi_3 \frac{\partial y}{\partial t}; \quad (8)$$

$$\xi_2 = \frac{Q_2 \rho_2}{\lambda_2}, \xi_3 = \frac{Q_2 \rho_3}{\lambda_3}, \quad (9)$$

где $\Theta_{пл}$ – относительная температура плавления порошка, К; $r = y(t)$ – закон движения фронта плавления; Q_i – удельная теплота плавления порошка, Дж/кг; ρ_i – плотность порошка, кг/м³; λ_i – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

На границе порошок – воздух задаются условия, аналогичные условиям, изложенным в [2], а также:

$$-\lambda_3 \frac{\partial \Theta_3}{\partial r} = \alpha \Theta_3, \quad (10)$$

где $\alpha = \alpha_{изл} + \alpha_{конв}$ – коэффициент теплоотдачи.

Метод решения поставленной задачи предложен Гринбергом [3].

Решение уравнения находим в виде:

$$\Theta_1 = \sum_{k=1}^{\infty} C_k^{(1)} J_0(\mu_k r); \quad (11)$$

$$\Theta_j = \sum_{k=1}^{\infty} C_{k_1}^{(j)} J_0(\mu_k r) + C_{k_2}^{(j)} N_0(\mu_k r). \quad (12)$$

Подставив (11), (12) в исходную систему уравнений, умножив на J_0 (или N_0) и проинтегрировав по r , получим бесконечную систему уравнений. Все эти уравнения связаны между собой. Однако, как показал Гринберг, недиагональные члены (т. е. члены, в которые входят Θ_i с i , не соответствующим номеру уравнения) очень малы по сравнению с диагональными, и мы можем пренебречь ими. В этом случае получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_k^{(1)}}{dt} = a_1 \mu_k^2 C_k^{(1)} + q_{k_1} \\ \frac{dC_{k_1}^{(2)}}{dt} = a_2 \mu_k^2 C_{k_1}^{(2)}, \frac{dC_{k_2}^{(2)}}{dt} = a_2 \mu_k^2 C_{k_2}^{(2)} \\ \frac{dC_{k_1}^{(3)}}{dt} = a_3 \mu_k^2 C_{k_1}^{(3)}, \frac{dC_{k_2}^{(3)}}{dt} = a_3 \mu_k^2 C_{k_2}^{(3)} \end{array} \right. \quad (13)$$

Здесь

$$q_{k_1} = \int_0^r r \frac{q_{vi}}{C_\gamma} J_0(\mu_k r) dr. \quad (14)$$

Далее необходимо найти μ_k . Как и в [2], $\mu_k(t)$ определяется из условия совместности системы уравнений. Записав условие, аналогичное условиям в работе [2], получаем систему линейных уравнений, решение которой возможно при:

$$\det A = 0 \quad (15)$$

$$A = \{a_{ij}\}, i, j = 1, \dots, 5,$$

где

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -J_0(\mu_k r_0); & a_{34} &= 0 \\
 a_{12} &= -\lambda_1 \mu_k J_1(\mu_k r_0) & a_{35} &= 0 \\
 a_{13} &= 0 & a_{41} &= 0 \\
 a_{14} &= 0 & a_{42} &= 0 \\
 a_{15} &= 0 & a_{43} &= 0 \\
 a_{21} &= -\lambda_1 \mu_k J_1(\mu_k r_0) & a_{44} &= J_0(\mu_k r_1) \\
 a_{22} &= \lambda_2 \mu_k J_1(\mu_k r_0) & a_{45} &= J_0(\mu_k r_1) \\
 a_{23} &= J_0(\mu_k r_1) & a_{51} &= 0 \\
 a_{24} &= 0 & a_{52} &= 0 \\
 a_{25} &= 0 & a_{53} &= 0 \\
 a_{31} &= 0 & a_{54} &= \lambda_3 J_0(\mu_k r_2) + \lambda_3 \mu_k J_1(\mu_k r_2) \\
 a_{32} &= J_0(\mu_k r_1) & a_{55} &= \lambda_3 N_0(\mu_k r_2) + \lambda_3 \mu_k N_1(\mu_k r_2) \\
 a_{33} &= N_0(\mu_k r_1)
 \end{aligned}$$

$$\left\{ \begin{array}{ccccc}
 a_{11} & a_{21} & a_{31} & a_{41} & a_{51} \\
 a_{12} & a_{22} & a_{32} & a_{42} & a_{52} \\
 a_{13} & a_{23} & a_{33} & a_{43} & a_{53} \\
 a_{14} & a_{24} & a_{34} & a_{44} & a_{54} \\
 a_{15} & a_{25} & a_{35} & a_{45} & a_{55}
 \end{array} \right. \cdot \quad (16)$$

Условия (7), (8) не используются при нахождении μ_k , т.к. скорость движения границы считается заданной. Она задается по закону (1), где β определяется из трансцендентного уравнения

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-\beta^2/4a_2}}{\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}} \operatorname{erf}\left(\frac{\beta}{2\sqrt{a_2}}\right)} = \frac{\xi_{i\bar{e}} \tilde{n}_{i\bar{e}}}{\Theta_{i\bar{e}} - \Theta_i}, \quad (17)$$

где erf – стандартная функция ошибок; $c_{пл}$ – теплоемкость расплавленного порошка; $\Theta_{i\epsilon}$ – температура плавления порошка К; Θ_i – температура стержня в процессе оплавления порошка К; $\xi_{i\epsilon} = \tilde{n}_{i\epsilon} \rho_{i\epsilon} / \lambda_{i\epsilon}$; $\rho_{пл}$ – плотность расплавленного порошка кг/м³; $\lambda_{пл}$ – теплопроводность расплавленного порошка.

Таким образом, для решения системы уравнений (2) с граничными условиями (3)–(10) и с заданной скоростью движения границы (1), (17) необходимо:

вычислить $\mu_k(t)$ по формулам (15), (16);

вычислить дополнительные величины по формулам (14), (17);

решить уравнение (13) с начальными условиями $C_{k_i}^{(j)}$, получаемыми из решения задачи [2].

Вычисления по вышеприведенной модели производили на ПЭВМ. Исследования показали удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных при наплавке металлических стержней порошком на железной основе (рисунок 2).

Таким образом, в результате исследований получена модель, позволяющая рассчитать движение фронта плавления при оплавлении порошкового материала заготовкой, разогреваемой электроконтактным способом.

С помощью предложенной модели можно определить толщину покрытия, получаемого методом электроконтактного оплавления.

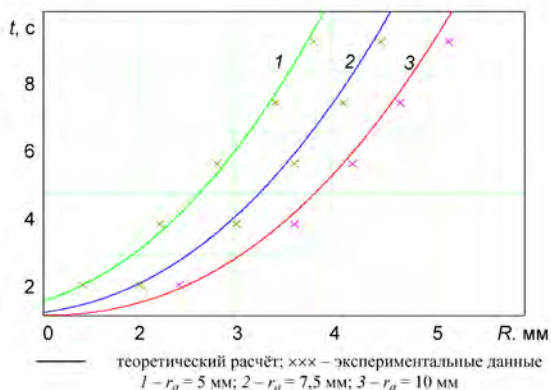


Рисунок 2 – Зависимость времени выдержки температуры t от толщины R наплавляемого покрытия

Литература

1. Оплавление порошкового материала при теплообмене с деталью, нагреваемой электрическим током / Ю.Н. Гафо [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2002. – № 1. – С. 48–50.

2. Белявин, К.Е. Расчет допустимой прочности сцепления износостойких покрытий зубьев роторных почвообрабатывающих машин при соударении с камнем / К.Е. Белявин, А.В. Сосновский, О.А. Баран // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 1. – С. 53–56.

3. Гринберг, Г.А. Об одном возможном методе подхода к рассмотрению задач теории теплопроводности, диффузии, волновых и им подобных при наличии движущихся границ и о некоторых иных его приложениях / Г.А. Гринберг // Прикладная математика и механика. – 1967. – Т. 31. – С. 193–203.

УДК 669.041:621.785

**П.С. ГУРЧЕНКО, д-р техн. наук (БНТУ),
А.А. СОЛОНОВИЧ (ОАО «МПЗ»),
Т.Н. СИНИЧЕНКО (БНТУ)**

ПУТИ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОКОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Повышение эксплуатационных свойств деталей машиностроения в условиях возрастающих нагрузок на узлы и агрегаты вследствие увеличения их мощности, скорости и грузоподъемности и других параметров эксплуатации может быть достигнуто либо применением новых сложнлегированных сталей и сплавов, которые ведут к значительному удорожанию продукции, либо совершенствованием технологии термической и химико-термической обработки традиционных конструкционных сталей, что также приводит к увеличению трудовых, материальных и энергетических затрат. Однако существуют методы упрочнения традиционных недорогих материалов, позволяющие значительно повысить прочность и